

1

INTRODUÇÃO

1.1

Motivação

A importância dos petróleos pesados vem crescendo significativamente nos últimos anos, em face de sua abundância no país e do cenário político internacional. A principal característica deste tipo de óleo é a sua alta viscosidade e a consequente dificuldade de transporte. Uma outra característica, comumente encontrada no escoamento desses óleos é a deposição de parafina, particularmente a baixas temperaturas. Altas potências de bombeamento são necessárias para manter o escoamento de um óleo pesado em um oleoduto.

Sabe-se que muitos desses petróleos pesados têm características reológicas viscoplásticas. Materiais com tal tipo de comportamento mecânico, sob certas condições de escoamento, ainda não muito bem conhecidas, apresentam deslizamento aparente na parede ao escoar internamente. Esse deslizamento tem o potencial de diminuir substancialmente a perda de carga em um escoamento. Esse tipo de fluido pode ser entendido como uma fase dispersa (que pode ser sólida formando uma suspensão, ser líquida formando uma emulsão ou ser gasosa formando uma espuma) em um meio contínuo que obrigatoriamente é líquido. Tal estrutura confere a esses fluidos uma propriedade reológica chamada de tensão limite de escoamento.

Fisicamente é possível entender a tensão limite de escoamento como a tensão mínima que deve ser aplicada ao material para induzir o escoamento, ou seja, sob uma tensão inferior à tensão limite de escoamento o material se comporta como um sólido. Mas a existência de uma tensão limite de escoamento real ainda encontra-se sob discussão na literatura. Há autores (9) (2) que argumentam que abaixo da tensão limite de escoamento o material não se comporta propriamente como um sólido, existindo um escoamento tão lento que dificilmente é observado. Conforme esse raciocínio o termo tensão limite de escoamento deveria ser alterado para tensão limite de escoamento aparente.

De qualquer forma, os fluidos estruturados que têm tensão limite de escoamento são classificados como fluidos viscoplásticos. Fluidos esses que

também apresentam como característica o fato de que a viscosidade cai dramaticamente quando a tensão limite é atingida (9). O efeito do deslizamento aparente é observado à baixas taxas de cisalhamento

O deslizamento aparente (2) observado no escoamento dos fluidos estruturados é proveniente de um fenômeno conhecido como deslizamento aparente (**wall depletion**) conforme pode ser observado na Fig. 1.1.

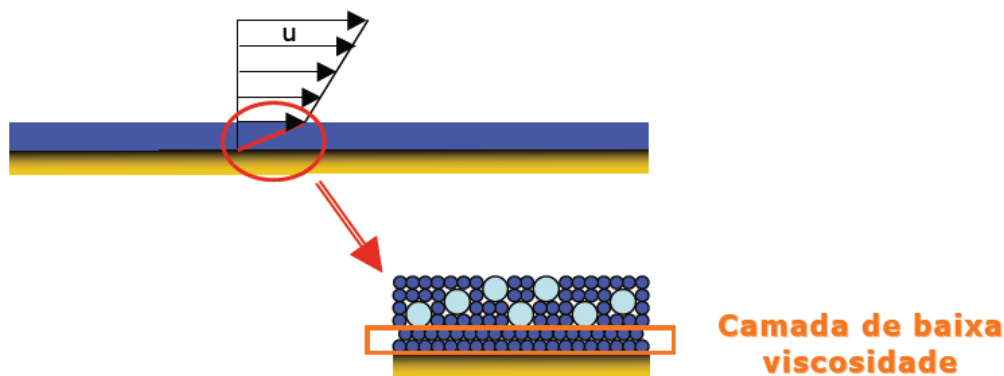


Figura 1.1: Deslizamento Aparente (**Wall Depletion**).

Esse fenômeno consiste no afastamento da fase dispersa em relação às superfícies sólidas, deixando uma fina camada de fluido da fase contínua de viscosidade mais baixa junto à parede. Isso ocorre devido às forças de configuração molecular, físico-químicas, eletrostáticas, viscoelásticas, gravitacionais, de pressão osmótica e hidrodinâmicas agindo na fase dispersa imediatamente adjacente às paredes sólidas, na presença ou ausência de escoamento. A formação dessa camada de fluido de baixa viscosidade junto à parede facilita qualquer escoamento sobre ela devido ao efeito da lubrificação, ocasionando o deslizamento aparente observado. Este comportamento dificulta bastante a caracterização das propriedades reológicas dos fluidos viscoplásticos.

Existe evidência experimental que leva a crer que o grau de deslizamento depende de duas propriedades da superfície interna do duto, a saber, a rugosidade e a molhabilidade (ou ângulo de contato) (23). Portanto, em princípio, diferentes tipos de revestimento interno devem implicar diferentes características de deslizamento.

1.2 Objetivos

O presente trabalho propôs-se a estudar o deslizamento aparente que ocorre em escoamentos de materiais viscoplásticos, visando o melhor entendimento das condições em que esse fenômeno se manifesta.

O segundo objetivo da pesquisa foi determinar a tensão cisalhante necessária para descolar uma quantidade de parafina depositada sobre os revestimentos, para tentar avaliar o nível de aderência da parafina em cada tipo de revestimento.

1.3

Organização do Trabalho

A dissertação está organizada em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo foi apresentada a motivação, os objetivos do trabalho e em seguida uma revisão bibliográfica de alguns trabalhos científicos que serviram para fundamentar esta dissertação.

O Capítulo 2 apresenta a formulação do problema, de forma a facilitar o entendimento do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

No capítulo seguinte é apresentado, de forma detalhada, os métodos experimentais realizados neste trabalho.

No Capítulo 4, os resultados são apresentados e discutidos.

Finalmente, no último capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas ao longo deste trabalho e sugestões para continuidade desta pesquisa.

1.4

Revisão Bibliográfica

Uma pesquisa bibliográfica foi realizada, visando obter informações a respeito do fenômeno de deslizamento.

Denn (11) apresenta que a condição de contorno de não deslizamento é um conceito muito importante na mecânica dos fluidos, sendo introduzido nos livros textos como sendo intuitivo e óbvio. Esta condição assume que a velocidade do fluido na parede é zero. Ele também (11) apresenta três teorias para o deslizamento de polímeros fundidos e soluções concentradas, afirmando que em um modelo pode ocorrer simultaneamente deslizamento devido à falha da aderência das cadeias poliméricas com a superfície sólida, deslizamento devido ao desenrolamento das cadeias próximas à parede e deslizamento devido à formação de uma camada de baixa viscosidade junto à parede.

Schowalter (21) fez uma revisão sobre o comportamento dos fluidos complexos com relação a uma superfície sólida. Rao et al. (20) apresentam o conceito proposto por Navier (18) de que a velocidade relativa do fluido com relação a superfície adjacente (velocidade de deslizamento), u_s , é proporcional a tensão cisalhante na parede ($\tau_w b = \eta u_s$). A variável b é o comprimento característico igual a distância onde o perfil de velocidade na parede deve ser extrapolado até atingir zero. Este parâmetro depende do par fluido-sólido.

Rao et al. (20) publicaram sobre o efeito da condição de contorno, do deslizamento no escoamento de fluidos em um canal. Os autores investigaram os resultados do deslizamento na parede sobre o escoamento em um canal de um fluido viscoso linear. Quando o deslizamento na parede depende da tensão normal, o campo de velocidade é qualitativamente diferente daquele no caso em que depende puramente da tensão de cisalhamento. Quando a velocidade de deslizamento depende somente da tensão de cisalhamento, as componentes de velocidade dependem somente de uma coordenada (coordenada y no caso abordado pelo trabalho), e a solução é muito similar à clássica solução de Poiseuille, porém seus valores de contorno para velocidade são não-nulos.

Chen, Kalyon e Bayramli (5) estudaram a extrusão de um polietileno de baixa densidade (LLDPE) através de capilares fabricados a partir de quatro materiais diferentes (cobre, aço inox, alumínio e vidro) com três diâmetros diferentes cada. Para o cobre, foram construídos capilares com duas rugosidades diferentes para a superfície. A velocidade do deslizamento foi deduzida a partir da dependência do diâmetro para com as curvas do escoamento. As maiores velocidades de deslizamento aparente foram observadas para o aço inox, enquanto para o alumínio, nenhum deslizamento foi observado. Eles então concluíram que tanto o material quanto a rugosidade contribuem para a magnitude do deslizamento. Conclusões similares foram descritas por Person e Denn (19), bem como por El Kissi e co-autores (15).

Barnes (2) fez uma completa revisão sobre o tema de deslizamento aparente e o fenômeno **wall depletion** reunindo todo o conhecimento científico existente até a época sobre este assunto. Ele ressaltou as condições em que o deslizamento aparente é favorecido, entre elas: grandes partículas como fase dispersa, pequenas dimensões do escoamento, grande dependência da viscosidade com a concentração da fase dispersa, baixas taxas de cisalhamento. Ele mostrou também as alternativas existentes na literatura para contornar o problema de deslizamento aparente. Uma delas é a realização de diversos ensaios variando as dimensões envolvidas no escoamento para obtenção dos resultados sem deslizamento por extrapolação matemática. Outra é a modificação física da parede para evitar a formação de uma camada de fluido de baixa viscosidade junto à parede devido ao fenômeno do deslizamento aparente.

Müller-Mohnssen et al. (17) realizaram o escoamento de soluções aquosas do polímero poliácridamida por tubos retangulares de vidro e mediram a velocidade do escoamento usando um microanemômetro. Em seguida eles construíram um tubo retangular em que as paredes opostas eram feitas de materiais diferentes, a saber, uma de vidro e outra de acrílico. A parede de vidro apresentou um maior deslizamento do que a parede de acrílico. Para uma

solução de 0,1% de PAM, quanto maior a vazão maior o deslizamento. Para uma vazão de 0,6 η l/min, quanto maior a concentração maior o deslizamento. A camada de baixa viscosidade diminui com o aumento da concentração do polímero. Uma verificação quantitativa do deslizamento pode ser realizada através da determinação da espessura da camada que se forma junta à parede. De acordo com resultados de Cohen e Metzner (6) (7) a espessura desta camada deve aumentar conforme a concentração do polímero diminui, o que permite a medição direta desta camada.

Agarwal et al. (1), publicaram um artigo sobre origens físicas e implicações na engenharia da migração de macromoléculas durante um escoamento. Durante o escoamento de uma solução polimérica, inicialmente homogênea, podem-se desenvolver gradientes de concentração dependentes da posição, devido à migração de moléculas de polímero com relação ao escoamento do corpo do fluido. Neste trabalho, foi revista a evidência experimental, especialmente as observações experimentais anômalas de interesse dos engenheiros, motivado pela transferência de calor, massa e momentum durante o escoamento de tais fluidos deslizantes. Foi mostrado que muitas previsões teóricas estão muitas vezes em conflito entre si mesmo qualitativamente, e estudos reportados com evidências experimentais diretas são poucos. O trabalho apresenta evidências experimentais diretas, desenvolvimento teórico e implicações práticas.

Delgado et al. (10) avaliaram o fenômeno de deslizamento aparente na parede durante o escoamento em tubos horizontais de ar com uma mistura de graxa lubrificante, que teve como objetivo medir a queda de pressão ao longo do duto para diferentes rugosidades e diâmetros. A equação modificada de Jastrzebski's para velocidade de deslizamento, baseada na introdução da rugosidade relativa, foi usada para corrigir o efeito de deslizamento. A expressão foi introduzida no tratamento clássico de Rabinowitsch-Mooney e aplicada para a velocidade líquida superficial, em vez de utilizar uma velocidade média da fase simples. Então, os dados da curva para o escoamento sem deslizamento, para a mistura de duas fases, foram obtidos a partir de tubos rugosos e comparados com os tubos que possuem superfície interna lisa. O efeito de deslizamento aparente em toda a extensão da parede foi estabelecido como função da taxa de escoamento de ar. A consideração de que a redução da superfície molhada do duto através do ar injetado permitiu uma adequada apresentação desse fenômeno foi confirmada pela redução no efeito de deslizamento aparente, contribuindo para a taxa cisalhante observada. Uma relação Power Law entre a velocidade de deslizamento e a tensão cisalhante na parede foi deduzida, embora essa tenda assintoticamente a ser linear com o

aumento da taxa de ar injetado.

Foi observado que a queda de pressão durante o escoamento de duas fases, graxa lubrificante e ar, em tubos rugosos, é maior do que em tubos com superfície lisa para a mesma vazão. Essa relação é mais sensível do que o acréscimo da vazão de líquido ou a mudança para tubos com diâmetros reduzidos. A equação modificada de Jastrzebski's, baseada na rugosidade relativa em vez de no diâmetro, foi usada para quantificar e corrigir o fenômeno de deslizamento aparente. Através dos valores de velocidade de deslizamento aparente, as correspondentes taxas cisalhantes aparentes corrigidas foram calculadas. A curva de escoamento sem deslizamento foi estimada a partir de dados experimentais em geometrias lisas e se mostrou uma boa comparação com aquelas experimentalmente obtidas pelo uso de dutos com uma alta rugosidade relativa. Considerando a contribuição do deslizamento para a taxa cisalhante aparente observada, foi notado que o deslizamento na parede é dramaticamente reduzido pela injeção de vazões muito baixas de ar. Esse fato pode ser explicado levando em consideração que o ar injetado tem o efeito de reduzir a área molhada da superfície do duto, reduzindo, assim, a magnitude da contribuição da velocidade de deslizamento aparente em termos da velocidade total do líquido. A velocidade de deslizamento aparente referida para tubos lisos, pode ser adequadamente descrita como uma função da tensão cisalhante na parede com o uso da relação Power Law. O expoente que foi encontrado depende da vazão de ar, atingindo assintoticamente o valor de um, isto é, tendendo a ser linear com o acréscimo da vazão de ar.

Joshi et al. (14) desenvolveram um modelo unificado, o qual prevê o deslizamento tanto pelo mecanismo de desenrolamento quanto pelo mecanismo de descolamento dependendo da energia de ligação do par parede-polímero. Este modelo é baseado na teoria da rede transiente, também estudada por estes autores (13), na qual cada processo de ativação para absorção e repulsão é considerado como ocorrendo na parede em paralelo com as cadeias que foram esticadas e absorvidas. Uma vez que os processos de absorção e repulsão dependem fortemente da energia de ligação entre o polímero e a parede, o modelo prevê que o deslizamento devido ao descolamento das cadeias perto da parede é devido às baixas energias de ligação, enquanto que o deslizamento ocasionado pelo desenrolamento das cadeias é devido às altas energias de ligação. Eles mostraram que a transição stick-slip ocorre devido ao comportamento não monotônico do escoamento nas proximidades da parede devido ao mecanismo do deslizamento. As previsões do modelo para a tensão cisalhante crítica na parede estão em bom acordo com os valores observados experimentalmente para diversos pares parede-polímero com energias de ligação variadas. Outro

fator importante que o modelo prevê, é que a temperatura necessária para o descolamento é diferente da temperatura necessária para o desenrolamento sob determinadas condições experimentais. Este modelo unificado pode ser usado tanto para polímero fundido quanto para soluções estruturadas e para diversos mecanismos em campos matemáticos comuns.

Outro fator importante que deve ser considerado quando se trata de deslizamento é o fato do tratamento da superfície. Methar et al. (16) descrevem o efeito das características de natureza física (por exemplo, rugosidade) e das características de natureza química (por exemplo, energia de superfície) na superfície da parede com relação ao deslizamento aparente de polibutadienos. Eles usaram cinco materiais diferentes e os resultados obtidos para o deslizamento variaram dramaticamente de material para material.

Seth (23) estudou suspensões concentradas que apresentaram deslizamento. Quando em contato com superfícies lisas, elas apresentavam um movimento aparente devido ao deslizamento na parede. Ele realizou experimentos com diferentes superfícies e dois comportamentos diferentes de deslizamento foram observados. Dependendo da interação entre as partículas do gel e a parede ser atrativa ou repulsiva, o deslizamento era suprimido ou promovido.